

基于分块处理的三维非局部均值降噪算法

刘 静, 陆利忠, 闫 斌, 陈 健

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 现有二维非局部均值降噪算法仅能抑制三维图像的层内噪声, 无法利用层间信息对图像进一步降噪。针对该问题, 分析印刷电路板在锥形束 CT 系统中所成图像的自相似性, 将现有二维算法扩展到三维空间, 提出基于分块处理的三维非局部均值降噪算法。实验结果表明, 该算法可进一步抑制噪声, 具有较高的计算效率。

关键词: 工业 CT; 三维图像; 图像降噪; 分块; 非局部均值降噪

3D Non-local Mean Noise Reduction Algorithm Based on Partitioning Processing

LIU Jing, LU Li-zhong, YAN Bin, CHEN Jian

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

【Abstract】 Existing 2D non-local mean noise reduction algorithm can only suppress the noise inside the slice, it can not access the noise between slices. Aiming at this problem, this paper analyzes image self-similarity which is generated by Printed Circuit Board(PCB) in Cone Beam Computed Tomography(CBCT), extends existing 2D algorithm to 3D space, and proposes 3D non-local mean noise reduction algorithm based on partitioning processing. Experimental results show that this algorithm can further restrain noise, and it has higher computational efficiency.

【Key words】 Industry Computed Tomography(ICT); 3D image; image noise reduction; partitioning; non-local mean noise reduction

1 概述

工业 CT(Industry Computerized Tomography, ICT)系统作为最佳的无损检测技术之一, 能清晰、准确地显示被检物内部清晰的断层图像, 发现缺陷部位, 实现无接触的无损探伤检测^[1]。

锥形束 CT(Cone Beam Computed Tomography, CBCT)系统属于最新一代的 ICT, 能够获得被检测物体内部三维空间各向同性的图像。由于 CT 图像噪声较大, 因此图像降噪技术一直是 CT 系统关注的热点问题。对于三维图像, 仍缺乏有效的三维图像降噪算法。

目前主流的二维图像降噪算法, 仅能抑制三维图像的层内噪声, 无法利用层间信息对图像进一步降噪, 造成图像的层内层间分辨率不同, 各向同性的性质遭到破坏。

印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)是各种电子产品的主要部件, 其性能好坏会影响电子产品质量^[2]。ICT 的一个重要应用领域是 PCB 质量检测。本文以使用 CBCT 进行 PCB 质量检测为背景, 根据锥束 CT 图像特点, 改进二维非局部均值降噪算法, 提出一种基于分块处理的三维非局部均值降噪算法, 将其进行分块处理以提高计算效率, 并将该算法应用于 CBCT 产生的 PCB 三维图像降噪中。

2 材料和算法

2.1 材料

所用图像为一块 6 层 PCB 板经 CBCT 扫描后生成的三维图像, 图像沿 X 轴方向进行切片, 共有 50 张切片, 每幅切片图像大小为 200×200。三维图像 26 连通示意图如图 1 所示。

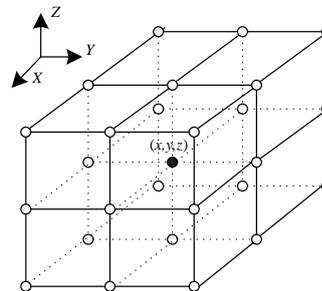


图 1 三维图像 26 连通示意图

2.2 非局部均值降噪算法

针对图像降噪, 已提出多种算法, 如高斯滤波、各向异性滤波、TV(Total Variation)模型等。大多数的降噪算法是基于以下 2 个假设提出的:

- (1) 图像中包含的噪声为白噪声, 由于噪声中包含高频成分, 因此会造成含噪图像振荡或不平滑。
- (2) 原始图像为平滑或分段平滑^[3]。这种假设造成基于上述算法降噪后的图像变得模糊。

2.2.1 二维非局部均值降噪算法

非局部均值算法假设图像存在一定的自相似性, 如图 2 所示。

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划基金资助项目(07230045 0240)

作者简介: 刘 静(1984—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 三维图像处理; 陆利忠, 教授; 闫 斌, 讲师、博士; 陈 健, 博士研究生
收稿日期: 2009-09-23 **E-mail:** tobelj@126.com

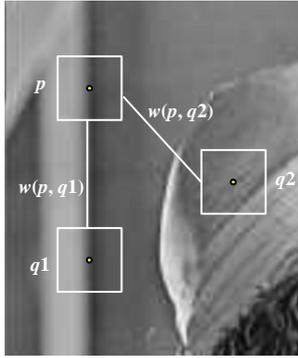


图2 图像的自相似性

其中, 包含 3 个像素 p , $q1$ 和 $q2$ 以及它们各自的邻域, 可以看出, 像素点 p 和 $q1$ 的邻域较为相似, 而 p 和 $q2$ 的邻域不相似。自相似的假设可以用于对图像降噪, 对具有相似邻域的像素点进行加权平均是非局部均值算法的基本思想。

在非局部均值算法中, 降噪后图像中像素点的灰度值由下式计算:

$$NL(V)(p) = \sum_{q \in V} w(p, q)V(q) \quad (1)$$

其中, V 为含噪声的图像; $NL(V)$ 为降噪后的图像, 权重因子 $w(p, q)$ 满足: $0 \leq w(p, q) \leq 1$ 且 $\sum_q w(p, q) = 1$, 每个像素点的灰度值是图像中全部像素点的加权平均。这些权重因子由像素点 p 和 q 的邻域相似性决定。为了定量衡量 2 个邻域的相似性, 定义 N 为以像素点 i 为中心的方形邻域, 邻域半径表示为 $Rsim$, 2 个邻域的相似性^[4]可表示如下:

$$d(p, q) = \|V(N_p) - V(N_q)\|_{2, F}^2 \quad (2)$$

其中, F 为邻域滤波器, 当 $Rsim=4$ 时的邻域滤波器示意图如图 3 所示。

$$F = \frac{1}{Rsim} \sum_{i=m}^{Rsim} 1/(2 \times i + 1)^2 \quad (3)$$

其中, m 为当前点到滤波器中心点的距离, 离中心点越近的像素, 该滤波器权重越大, 越到邻域边缘, 权重越小。该滤波器的权重为

$$w(p, q) = \frac{1}{Z(p)} e^{-d(p, q)/h^2} \quad (4)$$

其中, $Z(p)$ 为归一化常数, 定义为 $Z(p) = \sum_q e^{-d(p, q)/h^2}$, h 为权重衰减控制参数。

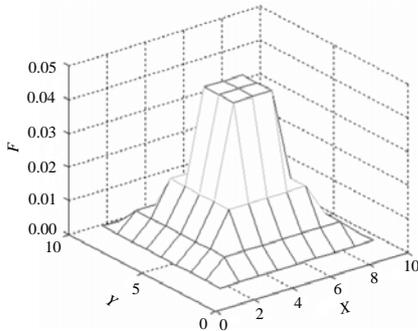


图3 邻域滤波器示意图

2.2.2 三维非局部均值降噪算法

将二维非局部均值降噪算法如图 4 进行三维扩展, 并将相似邻域的搜索范围限制在一定范围内^[5]减少计算量, 算法的符号说明如下:

$u: \Omega^3 \rightarrow R$ 表示原图像;

$u(x_i)$ 表示体素点 x_i 的灰度值;

V_i 表示中心点位于 x_i 处的立方体, 定义了相似邻域的搜索范围, $|V_i| = (2M + 1)^3$, $M \in N$;

N_i 表示体素点 x_i 的邻域, 大小为 $|N_i| = (2d + 1)^3$, $d \in N$ 表示邻域半径;

$u(N_i) = (u^{(1)}(N_i), u^{(2)}(N_i), \dots, u^{(N)}(N_i))^T$ 表示邻域 N_i 内体素点的灰度值向量;

$NL(u)(x_i)$ 为体素点 x_i 经滤波后的灰度值;

$w(x_i, x_j)$ 为对体素点 x_i 灰度值进行调整时, 体素点 x_j 灰度值的权值:

$$NL(u)(x_i) = \sum_{x_j \in \Omega^3} w(x_i, x_j)u(x_j) \quad (5)$$

对于搜索范围 V_i 内的每一个体素 x_j , 通过计算它与中心点 x_i 邻域的距离来衡量 2 个体素点的相似程度, 并根据相似度赋予相应的权值。

$$w(x_i, x_j) = \frac{1}{Z_i} e^{-\|u(N_i) - u(N_j)\|^2 / h^2} \quad (6)$$

其中, Z_i 也是归一化因子; 为保证 $\sum_j w(x_i, x_j) = 1$, h 为衰减控制因子。

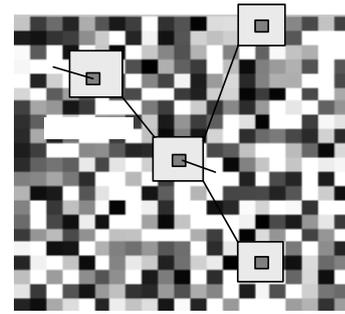


图4 三维非局部均值降噪算法示意图

从以上 2 种算法可以看出, 三维非局部均值降噪算法计算量很大, 对于 N^3 大小的三维图像, 计算复杂度在 $O((N(2M + 1)(2d + 1))^3)$ 的量级。如, 对于一幅实际的 PCB 图像, 大小为 $200 \times 200 \times 32$, 选择 $d=1$, $M=3$, 在 CPU 为 P43.0 的机器上进行三维降噪, 计算时间接近 3 h, 这大大降低了该算法的实际应用。因此, 对该算法进行优化, 得出分块处理的三维降噪算法。

2.2.3 基于分块处理的三维非局部均值降噪算法

本文算法符号说明如下:

B_i 表示中心位于 x_i 处的立方块, 且立方块中包含的体素个数 $|B_i| = (2\alpha + 1)^3$;

$u(B_i)$ 表示立方块 B_i 中包含的体素的灰度值向量;

$NL(u)(B_i)$ 表示滤波后立方块 B_i 中包含的体素的灰度值向量;

$w(B_i, B_j)$ 表示对立方块 B_i 灰度值进行调整时, 立方块 B_j 灰度值的权值。

该算法共分为 3 步:

(1) 将三维图像切分为相交的立方块。

将三维体数据 Ω^3 切分为相交的立方块 B_i , 每块大小为 $(2\alpha + 1)^3$, $\Omega^3 = \bigcap_k B_{ik}$, 且相邻立方块之间的交集不为 \emptyset , 如图 5 所示, 这些立方块以 x_i 为中心, 组成了 Ω^3 的一个子集。

x_{i_1} 均匀地分布在点 $i_k = (k_1n, k_2n, k_3n)$, ($k_1, k_2, k_3 \in N^3$) 处, n 表示 2 个 B_{i_k} 中心的距离。为确保去噪后图像的全局连续性, 须满足: $2\alpha > n$ 。

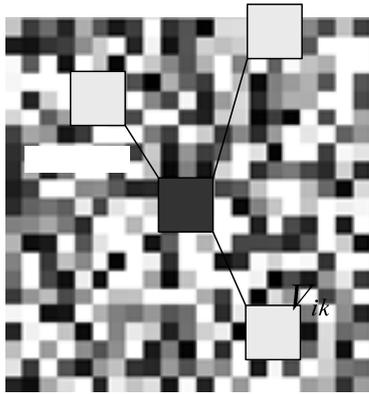


图 5 本文算法示意图

(2) 以立方块为最小单位进行三维非局部均值算法。 B_j 对每个立方块, 按照以下公式进行灰度值调整。

$$NL(u)(B_{i_k}) = \sum_{B_j \in V_{i_k}} w(B_{i_k}, B_j) u(B_j) \quad (7)$$

其中, $w(B_{i_k}, B_j) = \frac{1}{Z_{i_k}} e^{-\|u(B_{i_k}) - u(B_j)\|^2 / h^2}$; Z_{i_k} 为归一化常数, $Z_{i_k} = \sum_{B_j \in V_{i_k}} e^{-\|u(B_{i_k}) - u(B_j)\|^2 / h^2}$ 。化后可以保证 $\sum_{B_j \in V_{i_k}} w(B_{i_k}, B_j) = 1$ 。

(3) 调整相交立方块内的体素灰度值。

如果一个体素同时属于多个立方块, 则进行滤波后, 得到多个对该体素灰度值的估计, 如图 6 所示, 其中, $\alpha = 1, n = 2, |A_i| = 3$ 。不同的估计值将存储在向量 A_i 中, 最终体素 x_i 的灰度值定义为

$$NL(u)(B_{i_k}) = \frac{1}{|A_i|} \sum_{p \in A_i} A_i(p) \quad (8)$$

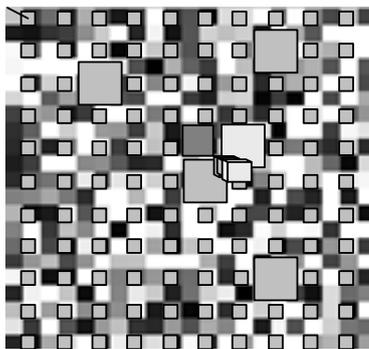


图 6 本文算法中重叠体素示意图

通过分块处理, 滤波算法的运算量大幅降低, 对于一幅大小为 N 的三维图像, 计算复杂度变为 $O((2\alpha + 1)^3(2M + 1)^3((N - n)/n)^3)$, 如 2.2.2 节的实例, $n = 2$, 计算复杂度变为原来的 1/8。

2.3 结果

本文所用图像为一块 6 层 PCB 板经 CBCT 扫描后生成的三维图像, 如图 7 所示, 其中, 图 7(a)~图 7(d) 为随机抽取的该三维图像的 4 幅连续切片, 可以看出, 图像噪声较大, PCB 板上要素基本淹没在噪声中。在 Windows XP 环境下基于 Matlab 2007(b) 软件, 分别使用二维算法、三维算法以及本文算法对三维图像进行处理, 结果分别如图 8~图 10 所示。

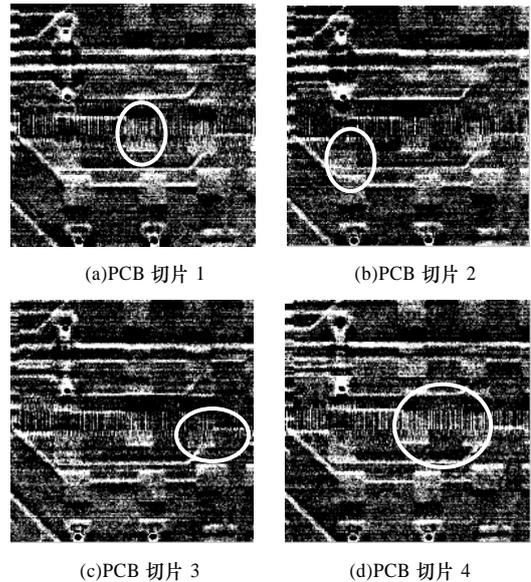


图 7 PCB 三维图像切片

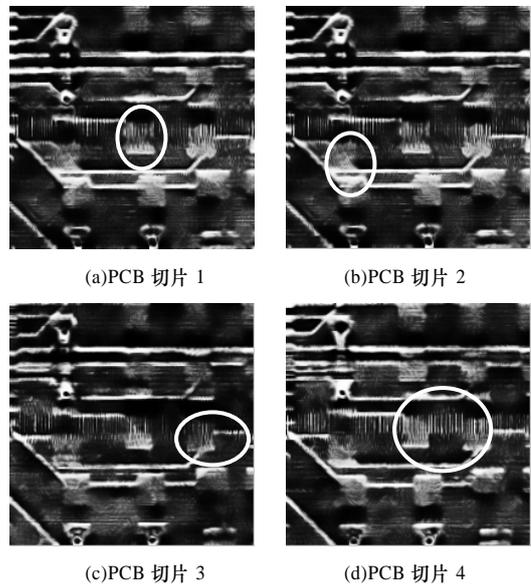


图 8 二维非局部均值降噪算法处理结果

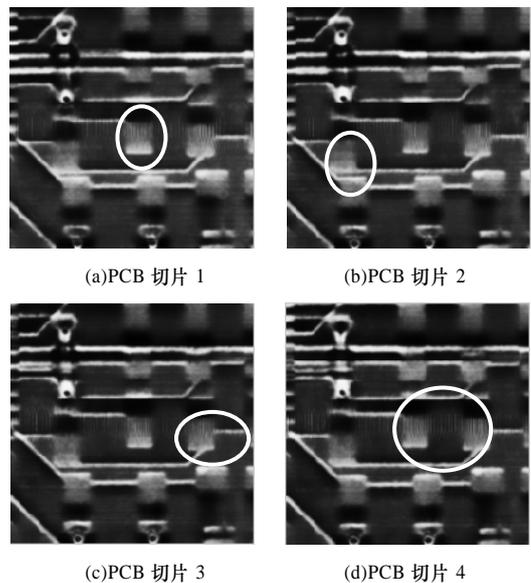


图 9 三维非局部均值降噪算法处理结果

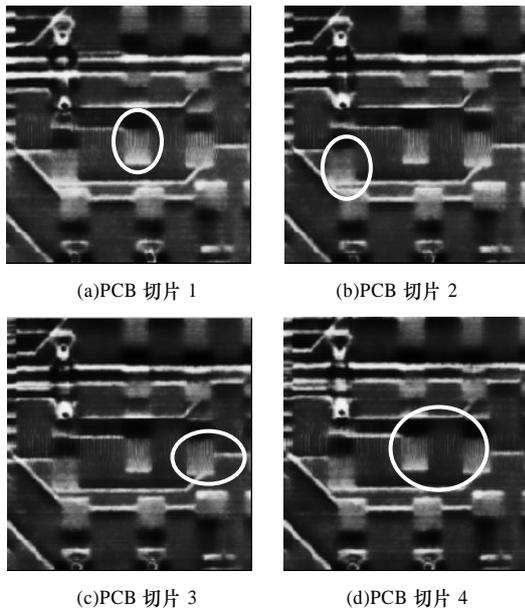


图 10 基于分块处理的三维非局部均值降噪算法

对三维图像进行三维非局部均值降噪和基于分块处理的三维非局部均值降噪,结果如表 1 所示,当 $n=2$ 时,后者的计算量相对较少。

表 1 2 种算法处理时间比较

图像大小	三维非局部均值 算法 $T1/s$	本文算法 $T2/s$	$T1/T2$
200×200×70	17 227.852 495	2 369.602 244	7.3
200×200×32	7 599.377 742	1 015.368 466	7.5

为测试本文算法的降噪性能,将一幅 $111 \times 111 \times 31$ 大小的三维图像,分别加入噪声强度 σ^2 为 3%, 9%, 15% 的高斯白噪声,并将噪声图像分别经本文算法进行处理,峰值信噪比 (PSNR) 如表 2 所示。

表 2 2 种算法的峰值信噪比比较

算法	噪声强度		
	3%	9%	15%
本文算法	28.405 9	27.812 7	27.248 2
三维非局部均值降噪算法	28.104 7	24.073 6	21.972 1

3 讨论

目前,国内集成电路产量快速增长,对 PCB 加工企业在生产效率和产品质量提出更高要求,ICT 正成为 PCB 质量检测领域的新技术^[6]。在 CT 系统中,X 射线束流或被测到的 X 光子数会引入量子噪声,系统内在物理限制会引入电子噪声和散射噪声,图像重建和校正会引入高频信息,造成重建后的图像噪声较大。

对于 PCB 图像,由于 PCB 板中焊锡与焊盘间的 CT 值差异不明显,因此造成图像的局部对比度较低。PCB 表面有大量焊锡,图像中会存在较大散射噪声。随着工艺的发展,PCB 走线越来越密,导线越来越细,在图像中所占像素点越来越少,这些特点都会造成 CT 图像质量进一步变差,给图像处理带来很大困难。

关于 PCB 质量检测,PCB 图像中导线是否断裂、焊点是

否存在漏焊是系统最关心的问题。在实际中,噪声的大量存在使得焊盘、导线信息大量缺失(如图 7 中圆圈标出部分)。对三维图像的切片图进行二维非局部均值降噪处理后,三维图像的层内噪声得到有效抑制,但仍存在层间噪声,使得图像的信息还原不全(如图 8 所示),很容易造成系统误判。

基于分块处理的三维非局部均值算法中包含 4 个参数,第 1 个是 h ,权重衰减因子,决定权值随指数曲线下降的快慢程度,如果 h 设置太小,则噪声就去不干净,如果 h 设置太大,图像就会变得模糊。第 2 个参数 f 用于衡量 2 个立方块相似度的邻域半径,如果 f 过大,则与当前立方块相似的立方块几乎找不到,但如果 f 过小,则会得到太多相似立方块。第 3 个参数为 α ,表示相似立方块搜索窗口的半径,窗口的中心点为当前立方块的中心体素, α 不宜太大,否则会导致计算量过大,且性能提升不高。第 4 个参数为相邻立方块的中心距离 n ,应满足 $2\alpha > n$ 。

对三维图像分别进行三维非局部均值降噪算法与本文算法处理,结果如图 9、图 10 所示。可见,三维图像中的噪声去除效果较好,图 8 圈内所示的缺失部分得到了有效恢复。性能的提升可以归结为层间信息的引入,如图 7(c)圆圈内的焊盘,由于噪声影响,信息损失较为严重,但上下 2 层相应位置图像信息保存较好,因此在降噪的过程中应充分利用。从图 9、图 10 及表 1 可以看出,分块处理算法在处理结果上与普通三维算法较为接近,而时间缩短较多,这对于数据量大的三维图像来说非常重要。另一方面,非局部均值降噪算法总体耗时较长,主要原因在于相似邻域的匹配过程,因此,如何借助邻域的统计特征对邻域进行预筛选是下一步工作的重点。

4 结束语

本文根据 CBCT 系统生成的三维图像的特点,提出一种基于分块的三维非局部均值降噪算法。该算法有效地抑制了 CBCT 图像中的噪声,同时对图像的清晰度影响不大。三维非局部均值降噪算法计算复杂度较高,而基于分块处理的三维非局部均值降噪算法可以减少运算时间,因此,如何借助邻域的统计特征对邻域进行预筛选是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 安洪振. 用于工业 CT 图像三维重建的边缘信息提取算法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(5): 876-879.
- [2] 张 琦. PCB 缺陷自动检测系统的研究与设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [3] Buades A, Coll B, Morel J. On Image Denoising Methods[R]. [S. l.]: Content Management License Administrator, Technical Report: 2004-15, 2004.
- [4] Gilboa G, Osher S. Non-local Linear Image Regularization and Supervised Segmentation[J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2007, 6(2): 595-630.
- [5] 石澄贤. Min/Max 曲率流实现图像去噪声和增强分析[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(5): 10-13.
- [6] Heish J. 计算机断层成像技术原理、设计、伪像和进展[M]. 张朝宗, 译. 北京: 科学出版社, 2006.

编辑 陆燕菲